



Universidad Pontificia Comillas, ICADE

ESTUDIO DEL HIDRÓGENO VERDE; RELACIÓN CON LA DESCARBONIZACIÓN.

Autor: Rafael Antonio Torralbo Romero

Director: Carmen Goytre Castro

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado se basa en un estudio de la situación actual del hidrógeno verde, sus aplicaciones y las distintas políticas aplicadas a esta energía, ya que en la actualidad el hidrógeno verde representa una de las herramientas con mayor potencial en la disminución de los gases de efecto invernadero a nivel mundial.

El objetivo de este estudio es analizar y exponer las ventajas y desventajas del hidrógeno verde y como puede ayudar en el proceso de descarbonización en España. En este sentido, esta investigación se realiza en base a un marco integral para categorizar las implicaciones que ha tenido España en este medio, formando parte de un sistema importante niveles bajo los esquemas europeos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que España será uno de los territorios europeos con mayor estabilidad para el año 2050 en consideración al uso del hidrógeno verde como fuente energética de consumo social.

Palabras Claves: Energía, cambio climático, agenda 2030, objetivos sostenibles, sostenibilidad, estrategias, Unión Europea, España.

Abstract

This Final Degree Project is based on a study of the current situation of green hydrogen, its applications and the different policies applied to this energy, since green hydrogen currently represents one of the tools with the greatest potential in the reduction of greenhouse gases worldwide.

The objective of this study is to analyze and expose the advantages and disadvantages of green hydrogen and how it can help in the process of decarbonization in Spain. In this sense, this research is carried out based on an integral framework to categorize the implications that Spain has had in this environment, being part of an important system under the European schemes.

According to the results obtained, it can be concluded that Spain will be one of the European territories with greater stability for the year 2050 in consideration of the use of green hydrogen as an energy source for social consumption.

Keywords: Energy, climate change, 2030 agenda, sustainable goals, sustainability, strategies, European Union, Spain.

Índice

Resumen	2
Abstract.....	3
1. Introducción.....	5
1.1. Presentación sobre hidrógeno verde y su modelo	6
1.2. Objetivos a desarrollar	8
2. Metodología.....	8
3. Hidrógeno verde introducción	9
3.1. Producción hidrógeno verde.....	10
3.1.1. Los hidrógenos por colores.....	13
3.2. Situación actual hidrógeno verde en el proceso de descarbonización.....	14
3.3. Aplicaciones en distintos sectores.	16
3.4. Políticas aplicadas al hidrógeno verde.....	18
3.5. Hidrógeno verde uso a nivel mundial.....	20
3.6. Hidrógeno verde frente a otras energías.	22
4. Objetivos de sostenibilidad del hidrógeno verde.....	24
4.1. Contexto Europeo	24
4.2. Contexto nacional	27
5. Objetivos para la descarbonización	28
6. Uso en España % energía	30
6.1. Oportunidades para España con el uso de hidrógeno para descarbonizar	30
6.2. Hidrógeno que se necesitaría en 2030 y 2050	33
7. Cantidad de energía necesaria para crear hidrógeno que deberíamos producir en las fechas estimadas.	34
8. Riesgos en la producción de hidrógeno verde	36
9. Conclusión.....	38
10. Bibliografía.....	40

1. Introducción

En la actualidad, los cambios climáticos han ido causando daños generales en todo el mundo, intensificando las crisis sociales y económicas, específicamente en Europa. En este contexto, los combustibles fósiles simbolizan las tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI en adelante) a nivel mundial (ONU, 2020).

Considerando el incremento de las sequías, los incendios, las inundaciones y los fenómenos meteorológicos graves, los diversos territorios a nivel global deben abandonar de forma rápida el uso de combustibles fósiles, con el objeto de hacer frente a los impactos climáticos, y a su vez, proteger el medio ambiente, y la vida humana para mantenerse debajo de los límites de calentamiento global de 1,5°C acogido en el acuerdo de París¹.

De acuerdo con esto, bajo una perspectiva de transición energética justa, el hidrógeno verde y sus procedentes, originados a partir de energías renovables, podrían representar un rol relevante para el sector industrial; con la facilidad de almacenamiento a largo plazo, podría reemplazar los combustibles fósiles y llenar los vacíos temporales en el suministro de energía renovable en una economía cada vez más electrificada.

El hidrógeno verde tiene una amplia gama de aplicaciones, especialmente para el acero, el cemento, la vitrocerámica, los fertilizantes químicos, la aviación y el transporte marítimo de larga distancia y otras industrias en las que la descarbonización y la electrificación son difíciles. Por lo tanto, se busca que el hidrógeno verde y sus derivados representen el 12 % del uso final de la energía en 2050 según los 1,5 °C de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, World Energy Transition Outlook, 1.5°C Pathway, , 2021)

Dado que el costo de producción del hidrógeno verde dependerá en gran medida del potencial de energía renovable (incluidos los costes), por ello, es probable que el comercio a nivel internacional de derivados como el hidrógeno o el amoníaco incrementen sustancialmente.

¹ ONU, (2015) Acuerdo de París; Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

En este contexto, se estima que el hidrógeno verde se exportará desde países con un potencial de energía renovable abundante y escalable, como la eólica, la solar y la geotérmica. Las proyecciones sugieren que alrededor de una cuarta parte del hidrógeno producido a nivel mundial se comercializará a través de las fronteras para 2050 (IRENA, 2022).

Alcanzar los objetivos climáticos acordados requerirá un rápido aumento en la producción de hidrógeno verde. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha confirmado que la producción mundial anual de hidrógeno a partir de fuentes renovables debe aumentar al menos a 500 millones de toneladas (Mt) para cumplir con el escenario de neutralidad climática². Sin embargo, es importante considerar que la mayor parte del hidrógeno probablemente se utilice a nivel local o nacional; exponiendo esto, el comercio internacional de hidrógeno verde y sus precedentes seguirán desempeñando un rol muy relevante. Además, en medio de una nueva realidad política en la que Europa y otros lugares están desprendiéndose de Rusia a la hora de comercializar con los combustibles fósiles debido a la actual guerra con Ucrania, existe una presión creciente para sustituir las importaciones. El plan "RepowerEU", publicado el 18 de mayo de 2022, duplica el objetivo de la UE de importar hidrógeno verde para 2030 a unas 10 toneladas métricas por año.

Asimismo, el hidrógeno podría traer consigo grandes beneficios y nuevas oportunidades en territorios para un desarrollo social y económico más justo, sostenible y estable, orientados en los derechos humanos y la conservación del medio ambiente, incentivando a las organizaciones a formar parte del uso de energías renovables y tecnologías vinculadas a la sostenibilidad.

1.1. Presentación sobre hidrógeno verde y su modelo

Por medio del uso de hidrógeno verde, es importante conceptualizar los riesgos a nivel comercial, las normativas políticas que contribuyan o perjudiquen dicho proceso a nivel

² La IEA incluye hidrógeno azul en sus escenarios, lo que no creemos que sea una opción sostenible. La producción actual de hidrógeno es de aproximadamente 70 Mt, de las cuales menos del 1 % proviene de fuentes renovables, véase AIE (n.d.), The Future of Hydrogen, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

nacional o internacional, siendo importante considerar las inversiones y la comercialización del hidrógeno verde como una herramienta que pueda desarrollarse de forma justa y sostenible.

En este contexto, para las economías en constante desarrollo como España, es imperativo el incremento del suministro de energías limpias con el propósito de alcanzar el séptimo objetivo para el desarrollo sostenible pautado por las Naciones Unidas y los objetivos estipulados en la agenda 2030.

En base a este contexto, estos objetivos cumplen un papel importante tanto para los territorios desarrollados como también, para los que se encuentran a favor del desarrollo, siendo esencial la expansión de energías renovables, seguido de la disminución de los consumos innecesarios de las energías y de mayores mejoras en la eficiencia energética. De este modo, será posible lograr un futuro energético 100% renovable y limpio, satisfaciendo las necesidades de energía limpia en los seres humanos, sus economías y entornos.

En países como España, considerando su importante potencial a nivel de recursos energéticos renovables, el hecho de producir hidrógeno verde se encuentra adaptado a un proyecto de crecimiento, debido a la inversión que se está realizando en el país apostando para que esta energía juegue un papel relevante en los próximos años, exponiendo como primer enfoque su producción y la exportación para aplicarlo en distintos procesos que favorecerán al proceso de descarbonización.

Para 2021 se habían establecido una gran cantidad de proyectos vinculados al hidrógeno limpio a nivel mundial (IRENA, 2022), considerando el crecimiento de este número debido a las preocupaciones y conflictos geopolíticos. En base a esto, se ha observado que los costos de producción de energías renovables y de los electrolizadores han ido disminuyendo, (Mix, 2022). Todo esto se produce por la disminución del mercado y sus estructuras las cuales no se encuentran completamente enfocadas, primordialmente, en base a los acuerdos bilaterales entre los futuros importadores y proveedores.

No obstante, es importante determinar que el hidrógeno verde será un híbrido en cualquier mercado mundial, con elementos de un mercado de materia prima, muy similar a las

comercializaciones actuales sobre hidrocarburos, aunque, estará influenciado por las opciones políticas, con respecto a la naturaleza verde del hidrógeno.

Asimismo, es importante tomar consciencia del beneficio que este factor representa, y al mismo tiempo determinar las competencias mundiales que pueden presentarse de forma despiadada por las producciones a bajo costos, llevando dichas prácticas a la afectación de entornos naturales en el mundo.

1.2. Objetivos a desarrollar

a) Objetivos Generales:

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste en investigar y analizar el hidrógeno verde como energía limpia, comprendiendo los procesos teóricos de este elemento como son su producción, almacenamiento, transporte y su forma de beneficiar el proceso de descarbonización, analizando sus distintas aplicaciones y su forma de producirse dentro del país realizando un impacto sostenible en la economía actual.

b) Objetivos Específicos:

- Analizar los métodos que dieron paso a la conformación y uso del hidrógeno verde como energía limpia.
- Exponer la capacidad de las políticas públicas en territorio español acerca del uso de energías renovables y su rol en la participación de la agenda 2030.
- Evaluar los riesgos que conllevan en su uso como futura energía en el país.
- Demostrar los avances y propuestas producidas al sector comercial con respecto al uso de energía limpia para satisfacer sus necesidades a corto y largo plazo.

2. Metodología

El diseño de este proyecto, está orientado a una revisión bibliográfica descriptiva, en el que se inicia por una investigación de carácter bibliográfico en el ámbito legal del territorio español; documentando los propósitos de que dieron paso a la conformación de estrategias sostenibles, y a la constitución de grupos líderes que incentivan el uso de hidrógeno verde como un medio de energía limpia, que contribuyen en el sistema energético a nivel comercial.

Analizando las bases de datos y distintas páginas electrónicas que poseen artículos centrados en la temática de este estudio, dando paso a la búsqueda de documentos que expongan la sostenibilidad en materia energética adoptada por medio del uso de hidrógeno verde como energía limpia para satisfacer las necesidades de los seres humanos con grandes beneficios a largo plazo, los cuales serán puntualizados a través de este proyecto, y como estas situaciones han formado parte de las políticas sostenibles en España, revisando los artículos que cumplieran con los criterios anteriormente planteados. En este sentido, el enfoque analítico y descriptivo aplicado, se centra en la constitución de un proyecto con elementos de una investigación cualitativa, describiendo este punto, como una estrategia de índole académico en el que se usa de forma privilegiada las informaciones de tipo académicas como, libros, informes etc., siendo principal estudio, fundamentarse en la descripción específica de este tema de estudio.

En efecto, la estrategia metodológica aplicada es de tipo cualitativa, el cual se apoya en la recolección de datos, de tal forma, que solo se manifiesten interrogantes que, a su vez, puedan ser respondidas, que compongan este estudio basadas en el tema en cuestión.

3. Hidrógeno verde introducción

En primer lugar, la descarbonización del planeta es uno de los principales objetivos que se ha marcado en los últimos tiempos en países a nivel global, estableciéndola como meta para el año 2050. Para llegar a lograr este objetivo, considerando la descarbonización de un elemento como el hidrógeno, es necesario disminuir las emisiones totales de CO₂ en el consumo mundial, con la finalidad de dar lugar al hidrógeno verde, revelándose como una de las medidas claves para prolongar la vida del ambiente.

De acuerdo con esto, el mecanismo de vida humano necesita cada vez más vatios para funcionar de forma adecuada; en este contexto, las últimas estimaciones expuestas por la Agencia Internacional de la Energía (AIE en adelante), documentadas a final del año 2019, pronostican un incremento de la demanda energética a nivel mundial de un 30% hasta 2040 (IAG, 2019), considerando que en una economía dependiente del carbón y el petróleo como fuente, compromete al mundo a la producción de CO₂ y por ende, el fortalecimiento del cambio climático perjudicando a las generaciones futuras.

El hidrógeno verde se obtiene por medio de la tecnología orientada a la generación de hidrógeno³ por medio de un procedimiento químico conocido como “electrólisis”. Esta metodología es implementada a través de la corriente eléctrica con el objeto de separar el hidrógeno del oxígeno que se encuentra en el agua, por lo tanto, si la electricidad se obtiene de fuentes renovables, se puede llegar a utilizar energía sin la emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera.

De esta forma se lograría realizar un ahorro de 830 millones de toneladas cada año de CO₂, que se ocasionarían cuando este gas se produce por medio de combustibles fósiles. Por otra parte, es importante conceptualizar que el reemplazo del hidrógeno mundial significaría 3.000 TWh renovables adicionales anualmente, siendo similar a la demanda actual en territorio europeo.

Sin embargo, es relevante determinar las interrogantes sobre la viabilidad que tiene el hidrógeno verde por sus altos costos en su producción, siendo unas dudas razonables que serán estimadas por medio de un análisis que determine las opciones más viables practicadas en este proyecto en curso.

En este sentido, el hidrógeno es reconocido como un elemento químico con mayor abundancia en la naturaleza, estimando su demanda como combustible como una opción triplicada desde 1975 (IAG, 2019). Asimismo, el hidrógeno verde es una fuente de energía limpia que solo puede emitir vapor de agua, sin la necesidad de dejar residuos en el aire a diferencia de otros elementos más tóxicos como lo es el petróleo y el carbón.

Por una parte, se entiende que el vínculo del hidrógeno con la industria se ha utilizado desde el siglo XIX empleado como combustible para coches, naves espaciales, entre otros. Por lo tanto, la descarbonización de la economía global es un hecho que se espera pueda llegar al 50% para 2030.

3.1. Producción hidrógeno verde

En la actualidad y gracias a los diversos estudios realizados a lo largo del tiempo, se han podido identificar diversos métodos de producción del hidrógeno verde, puesto que es un

³ El hidrógeno es un tipo de combustible universal muy reactivo.

elemento que no se puede obtener en todas partes. En este sentido, es importante determinar que existen diferentes fuentes de energía primaria que pueden transformarse en forma de luz, energía eléctrica, calor o combinaciones de estas fuentes nombradas. Sin embargo, existen una cantidad de métodos que se han implementado como los que se siguen desarrollando para incrementar y fortalecer la transformación de este elemento (Felipe Givovich, 2022).

Uno de los principales métodos, siendo este el más universal se enfoca en la reformación con vapor del gas natural, reconocido como Reformado de Metano con Vapor (SMR). En este punto, el vapor y el gas natural, los cuales son tratados para llegar a eliminar contaminantes, se proceden a calentarse juntos hasta llegar a la presión de 900°C sobre el catalizador del níquel. Dicho resultado, se estima como una mezcla de monóxido de carbono (CO) y de hidrógeno reconocido en este caso como syngas. De acuerdo con esto, el syngas se trata posteriormente en una reacción de transformación de gas a agua, con la finalidad de producir más cantidad de hidrógeno y dióxido de carbono de la siguiente forma:

Tabla 1 Reformación de metano a vapor

<p style="text-align: center;">Reformado de metano por vapor</p> <p>A altas temperaturas y presiones, el metano y el vapor reaccionan como se describe en la siguiente ecuación;</p> $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ <p>El compuesto de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) se denomina syngas y puede utilizarse para sintetizar otros productos. Se puede producir más hidrógeno sometiendo el syngas a la reacción de cambio de gas a agua, que se muestra a continuación, a temperaturas más bajas.</p> $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ <p style="text-align: center;">La reacción global del proceso es entonces</p> $CH_4 + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 4H_2$ <p>El metano y el agua aportan cada uno 2 moléculas de hidrógeno. El hidrógeno se extrae de esta mezcla de gases mediante un proceso conocido como adsorción por oscilación de presión, lo que aumenta la energía necesaria (y, por tanto, la emisión de CO₂).</p>
--

Fuente: elaboración propia, 2023.

En la actualidad el CO₂ producido se va liberando hacia la atmósfera, aunque este puede utilizarse como subproducto, un ejemplo de ello es el procesamiento y el embotellado de los alimentos, donde se van liberando nuevamente a la atmósfera. Los procesamientos

ligados al reformado con vapor se van obteniendo del calor necesario que impulsa la reacción de la combustión, en este caso del gas natural, que, a su vez, produce más cantidad de CO₂ como se señala en la tabla 1.

Otro de los métodos que se encarga del suministro del calor a la reacción de reformado con vapor es un procedimiento reconocido como oxidación parcial del metano, el cual generada por el calor a medida que se va produciendo la reacción, la reacción de la oxidación parcial puede irse acoplando a la reacción del reformado con vapor, con el objeto de crear lo que se conoce hoy en día como reformado autotérmico (ATR en adelante). Por lo tanto, al no necesitar del suministro del calor externo, se trata de un reformado más eficiente y compacto, dando como resultado la disminución de los costes y de las emisiones de carbono (Felipe Givovich, 2022).

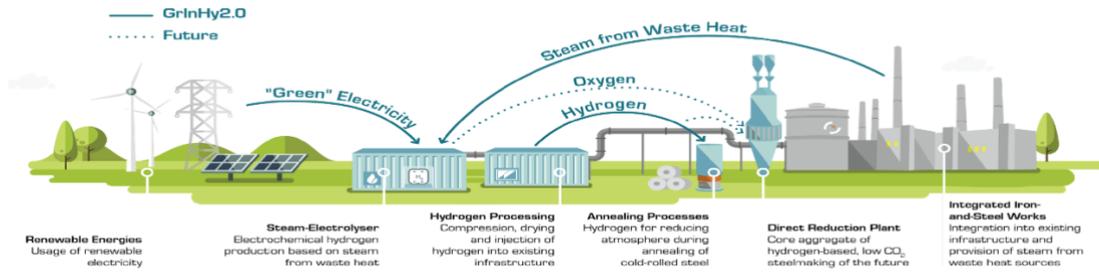
Ahora bien, para descarbonizar ambos procedimientos orientados en metano, el CO₂ producido debe ser identificado y resguardado en un depósito geológico. Dichos proyectos encargados de la captura y almacenamiento de carbono (CCUS en adelante) necesitan del bombeo de CO₂ en depósitos geológicos como lo son, los yacimientos agotados del gas y petróleo.

Tabla 2 Oxidación parcial y reformado autotérmico

Oxidación parcial y reformado autotérmico
La oxidación parcial es otra vía para producir hidrógeno. El metano se mezcla con suficiente oxígeno o aire para producir syngas. Éste puede ser procesado de nuevo por la reacción de cambio de gas a agua para producir más hidrógeno.
$2CH_4 + O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2$
El compuesto de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) se denomina syngas y puede utilizarse para sintetizar otros productos. Se puede producir más hidrógeno sometiendo el syngas a la reacción de cambio de gas a agua, que se muestra a continuación, a temperaturas más bajas.
$3CH_4 + O_2 + H_2O \rightarrow 3CO + 7H_2$

Fuente: elaboración propia, 2023.

Ilustración Procedimiento del Hidrógeno verde



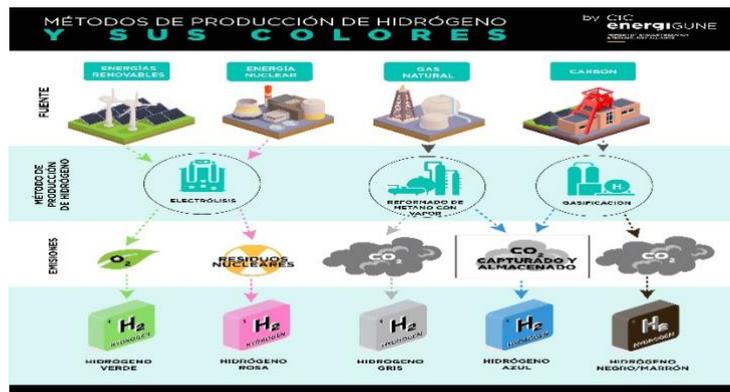
Fuente: (Felipe Givovich, 2022)

3.1.1. Los hidrógenos por colores

Cada uno de los procedimientos de producción del hidrógeno pueden ser caracterizados mediante la asignación de un color, aunque el hidrógeno es un elemento incoloro, estas identificaciones son anotaciones abreviadas describiéndose de la siguiente forma:

- El color gris se obtiene por medio del reformado del metano en conjunto con el vapor y el CO₂, el cual es producido liberándose hacia la atmósfera.
- El color azul se obtiene por medio del reformado con vapor, aunque en este caso el CO₂ se captura y es almacenado a través de un sistema CCUS.
- El color verde se obtiene a través del electrólisis del agua (o en su defecto del vapor), implementando la electricidad que se obtiene como una fuente renovable, como lo es la solar o la eólica.
- El color rosa se obtiene por medio del electrólisis del agua, al momento que la electricidad procede de la energía nuclear.
- El color negro o marrón, puede obtenerse partiendo del carbón por medio de la gasificación, aunque este último, es un procedimiento muy contaminante, puesto que se libera CO₂ hacia la atmósfera.

Ilustración Los colores de los procesos de hidrógeno verde



Fuente: (Felipe Givovich, 2022)

3.2. Situación actual hidrógeno verde en el proceso de descarbonización

En la actualidad, el hidrógeno verde es uno de los elementos que más abunda en la naturaleza; de acuerdo con esto, en cada molécula de agua existen dos átomos encontrados, el hidrógeno y el oxígeno, ambas pueden obtenerse de diferente forma como se ha expuesto en el párrafo anterior, siendo en la actualidad una de las tecnologías con mayor eficiencia en base a los hidrocarburos.

No obstante, una de las condiciones relevantes para que el hidrógeno pueda ajustarse a un modelo de energía limpia es que pueda formar parte de un ciclo completo en su modo de elaboración, siendo de este modo, libre de emisiones de carbono. Por este motivo, está adquiriendo cada vez más importancia en el esfuerzo mundial por reducir las emisiones de carbono debido a su capacidad para hacerlo en sectores económicos clave. El hidrógeno verde ofrece una alternativa prometedora para lograr la transición a una economía más sostenible y baja en carbono, mientras el mundo busca formas de mitigar el cambio climático y reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

Sin embargo, el hidrógeno verde se ha convertido en un actor clave en la lucha contra el cambio climático y en el impulso de la descarbonización en la actualidad. Se ha posicionado como una solución prometedora en la transición hacia una economía de baja en carbono debido a su potencial para reducir las emisiones de carbono y reemplazar los combustibles fósiles en varios sectores estratégicos.

En primer lugar, el hidrógeno verde está contribuyendo significativamente a la descarbonización de la industria energética. El reto de gestionar la naturaleza intermitente de estas fuentes surge a medida que aumenta la capacidad de generación de energías renovables, ya que la producción de electricidad no siempre se ajusta a la demanda. Aquí entra en juego el hidrógeno verde. Es posible crear hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua utilizando electricidad renovable. Este hidrógeno puede almacenarse y utilizarse para generar electricidad cuando la demanda es alta o la producción de energía renovable es baja. Esta capacidad de almacenamiento y suministro de hidrógeno verde favorece una mayor integración de las fuentes de energía renovables en la red eléctrica y exige una solución flexible y sostenible.

En la industria del transporte, el hidrógeno verde desempeña un papel importante en la descarbonización de los vehículos. El único subproducto de la conversión del hidrógeno en electricidad -que alimenta el motor- en los vehículos impulsados por hidrógeno es el vapor de agua. Este proceso utiliza pilas de combustible basados en la combustión. Esto significa que los vehículos impulsados por hidrógeno no emiten gases nocivos y contribuyen a mejorar la calidad del aire en las ciudades. Además, en comparación con los vehículos impulsados por baterías, el hidrógeno verde ofrece mayor autonomía y tiempos de carga más rápidos, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones como camiones comerciales, autobuses y camiones que deben recorrer largas distancias y funcionar durante periodos prolongados.

Otro sector en el que el hidrógeno verde está desempeñando un papel crucial es la industria. Numerosos procesos industriales dependen del hidrógeno como fuente de calor o reactivador químico. El cambio del hidrógeno convencional, que se produce a partir de combustibles fósiles, al hidrógeno verde puede influir significativamente en la reducción de las emisiones de carbono vinculadas a estas actividades industriales. Utilizado además en la fabricación de materiales y productos químicos, el hidrógeno verde presenta oportunidades para el desarrollo de bienes más sostenibles y bajos en carbono.

Además, el hidrógeno verde está ayudando a acelerar la descarbonización en industrias como la refrigeración y la calefacción. En edificios residenciales y comerciales, la producción de hidrógeno verde puede utilizarse para generar calor y proporcionar servicios de refrigeración y calefacción. Esto es especialmente cierto en zonas en las que

el cambio climático contribuye significativamente a las emisiones de dióxido de carbono. Es posible conseguir una reducción significativa de las emisiones de carbono y mejorar la eficiencia energética de los edificios sustituyendo los combustibles fósiles utilizados en los sistemas de calefacción por hidrógeno verde.

A pesar de los avances y las oportunidades que ofrece el hidrógeno verde, aún quedan retos por superar. Uno de ellos es el coste de producción. Aunque se prevé que los costes disminuyan a medida que se desarrollen economías de escala y tecnologías más eficientes, producir hidrógeno verde sigue siendo más caro que hacerlo con combustibles fósiles. Otro reto es la infraestructura necesaria para el almacenamiento, transporte y distribución de la energía verde, que debe desarrollarse y adaptarse para permitir su adopción generalizada.

Teniendo en cuenta todos estos retos, el hidrógeno verde se está convirtiendo rápidamente en un componente crucial de la descarbonización y la transición a una economía baja en carbono. El aumento de la inversión, la adopción de políticas benévolas y la colaboración entre industrias y naciones son esenciales para acelerar su desarrollo y maximizar su efecto en la lucha contra el cambio climático. El hidrógeno verde se presenta como una solución prometedora y necesaria para lograr un futuro más sostenible y libre de carbono por su capacidad para reducir las emisiones de carbono en sectores clave como la energía, el transporte y la industria.

3.3. Aplicaciones en distintos sectores.

Uno de los grandes beneficios que tiene este combustible es que puede ser utilizado principalmente de forma directa o indirecta añadiéndolo a conductos posteriormente contruidos para el transporte del gas. Esto último hace que pueda ser utilizado como principal fuente de energía no transitoria, de forma contraria a lo que ocurre con múltiples energías renovables, siendo uno de los sectores que utilizan este tipo de combustibles los siguientes:

En el sector industrial este tipo de combustible ha sido implementado por el sector industrial en el proceso de tratamientos de metales y la descomposición de amoniacos; no obstante, el hidrógeno verde podría llegar a identificarse como una opción más sostenible y limpia en el reemplazo de combustibles fósiles.

De este modo, se señala que para el año 2050 este tipo de combustible renovable pueda permitir mitigar la emisión de una cantidad comprendida en 600 millones de toneladas de CO₂ hacia la atmósfera, específicamente si es utilizada como un motor principal en la industria del territorio europeo.

En el sector de los automóviles es otro de los sectores donde el hidrógeno verde ha ido comenzando a tener presencia, debido a que se ha ido utilizando como combustible para distintos tipos de vehículos, siendo esto un modelo más limpio y eficiente a comparación de las baterías eléctricas convencionales. En este sentido, el beneficio principal del uso de este combustible frente a la electricidad radica en que puede ser recargada con mayor facilidad y rapidez. Del mismo modo, es importante señalar que este es un tipo de combustible alternativo el cual no produce ruido ni vibraciones, siendo esencial para el uso dentro de zonas urbanísticas o el transporte de todo tipo de mercancías.

Otro de los mayores beneficios del hidrógeno verde radica en el ámbito doméstico, debido a que se implementa como combustible para el calentamiento de los hogares o como un posible método para cocinar, siendo una de sus ventajas que se convierte en un medio accesible ya que los costos adquiridos no son tan elevados como lo son los del gas natural o el petróleo, debido a que el hidrógeno no produce emisiones durante su utilización, convirtiéndolo así en una opción sostenible a largo plazo.

El hidrógeno verde es también implementado con mayor intensidad como combustible para generar suministro eléctrico, considerando que su ventaja radica en los bajos costos en comparación del uso de otros combustibles como se especifica en el caso del sector doméstico, debido a que no produce emisiones durante el proceso en el que se quema, convirtiéndolo en una opción más sostenible con el medio ambiente. Del mismo modo, es relevante exponer que el hidrógeno verde puede ser utilizado en combinación con otras fuentes energéticas, como la energía solar o la energía eólica, permitiendo mejorar la generación de suministro eléctrico (Felipe Givovich, 2022).

De acuerdo con estas exposiciones, lograr la independencia del suministro eléctrico y abordar proyectos que disminuyan los cambios climáticos son situaciones que dependen

en gran parte de la viabilidad del proceso del hidrógeno verde, todo esto será uno de los factores clave para lograr una autonomía total enfocada en las metas para el año 2050.

Considerando las alternativas aplicadas en el mundo, en Occidente y el continente de Asia, más de 30 territorios se encuentran colocando en marcha nuevas iniciativas para el desarrollo de catalizadores de hidrogeno. Ahora bien, en el caso del territorio español, el hidrogeno verde ya se está implementando en ciertas aplicaciones, estimando que durante los próximos años se extienda a usos más generalizados como los especificados en este punto.

3.4.Políticas aplicadas al hidrógeno verde.

En territorio español, los potenciales económicos con respecto al hidrógeno verde se estiman como un alcance importante a nivel financiero. Los desarrollos de una economía en base al hidrógeno se perciben como una estrategia de desarrollo de nivel industrial y de diversificaciones económicas, además que es una herramienta que permitiría avanzar en una descarbonización entrando en un esquema de competitividad (Escribano, 2021).

En este caso, los proyectos con referencia al hidrógeno se destacan entre los representados en España mediante el programa de Next Generation estipulado por la Unión Europea (UE en adelante) (Escribano, 2021). Sin embargo, es consecuente señalar que las estrategias por parte de España contemplan las exportaciones de los excedentes del hidrógeno verde a nivel nacional a corto, medio y largo plazo, centrando de esta manera, las políticas públicas e industriales en la creación de nuevos clústers y valles de hidrógeno que potencien su producción y consumo propio con crecimientos económicos ligados a ellos.

En este mismo orden de ideas, España se beneficia en los costos de hidrógeno renovable, siendo uno de los más competitivos en toda Europa gracias a las posibilidades de hibridar recursos solares y eólicos, puesto que cuenta con terrenos y experiencia en la labor de las energías renovables (Consulting & Management, 2021).

En la actualidad España se encuentra produciendo una cantidad de 500.000 toneladas de hidrógeno anuales para uso industrial, siendo el 70% para uso de refinerías y el 25 para

las industrias químicas, considerando esto, las estrategias y hoja de ruta de hidrógeno verde en España especifican que para el 2030 el objetivo es alcanzar al menos un 25% de hidrógeno verde sobre el total de hidrógeno utilizado. En este sentido, para el año 2030 el hidrógeno verde se encontraría destinado para usos no convencionales como el transporte pesado y la siderurgia entre otros muchos más usos.

Cuatro comunidades autónomas ya han presentado sus planes, cuyos objetivos combinados ascienden a 1 GW de electrólisis para 2030, un 25% de los objetivos nacionales establecidos en la hoja de ruta de 2020. Las estrategias incorporan objetivos específicos para el transporte y la industria, con diferentes aplicaciones según la estructura económica de cada región. En el País Vasco y la Comunidad Valenciana se centran en sustituir el consumo de hidrógeno convencional en los sectores de refino y petroquímico. Navarra, sin consumo convencional de hidrógeno, apuesta por una sustitución paulatina del gas fósil, hasta un 5% para 2030, y el desarrollo tecnológico asociado. Castilla y León identifica como objetivo las exportaciones a la industria metalúrgica asturiana. En cuanto al transporte, todas las estrategias incorporan objetivos para la construcción de estaciones de servicio de repostaje de hidrógeno enfocadas a la descarbonización del transporte de mercancías, priorizando las rutas de mayor volumen de tráfico. La Comunidad Valenciana es la única en establecer objetivos específicos asociados al ferrocarril de hidrógeno. (Escribano, G., Lázaro, L., Urbasos. I.,2022)

A estas cuatro estrategias se unen las de Aragón, Canarias y Andalucía, que no cuentan con objetivos específicos, pero sí con líneas maestras y planes de actuación diferenciados. Aragón prioriza la integración de la región en el Valle del Ebro, identificando posibles redes de gas fósil convertibles a hidrógeno, ubicaciones para el almacenamiento subterráneo y polos industriales de consumo final, así como el desarrollo de hidrogeneras y su uso en el proyecto de ferrocarril Canfranc-Pau. Las Islas Canarias identifican la generación de hidrógeno renovable como vector de descarbonización, principalmente como solución para el almacenamiento de la generación renovable excedentaria. También han surgido iniciativas público-privadas de carácter regional enfocadas a descarbonizar sectores específicos, como el Valle del Hidrógeno de Cataluña en torno al complejo petroquímico de Tarragona, el Valle del Hidrógeno Verde en Murcia para desarrollar la cadena de valor en torno a Escombreras, y el clúster Puerta de Europa de hidrógeno verde

para descarbonizar el polo químico de Huelva. (Escribano, G., Lázaro, L., Urbasos. I.,2022)

Asimismo, es importante comentar que esta hoja de ruta vino vinculada a la aprobación de propuestas como MITERD, siendo este el proyecto estratégico en la transformación y recuperación económica (PERTE) en cuanto a las energías renovables, Hidrógeno verde y el Almacenamiento (ERHA).

Considerando esto el PERTE, busca situar al hidrógeno en una posición importante, dotándolo de 1.555 millones de euros públicos, que se esperan, puedan ser movilizados para la producción de casi el doble del capital en el ámbito privado, con el objeto de alcanzar los objetivos pautados para el 2030.

No obstante, las crisis energéticas que atraviesa Europa y el plan de REPowerEU establecido por la UE, han intensificado estas ambiciones en España. En este contexto, durante el mes de octubre del año 2022, el gobierno aprobó el “plan de seguridad energética”, fortaleciendo la dotación financiera para el plan de recuperación, con el objeto de proyectar a España como un territorio con un futuro comprometedor con respecto al hidrógeno dentro de la UE. De este modo, el plan acelera la ejecución del PERTE de energías renovables, hidrógeno verde y el almacenamiento, extendiéndolo en 1.000 millones de euros adicionales (Urbasos, 2022). De esta manera, el territorio español se alinea con REPowerEU, exponiendo su duplicación con los objetivos establecidos por Europa en la producción y en la importación del hidrógeno verde para el año 2030.

Uno de los principales impulsos que fortalecen el crecimiento y la adjudicación de nuevos proyectos con respecto a este tema, radica en las creaciones de normativas geográficas. En este sentido, España es un componente clave del paquete de medidas aplicadas en los diferentes niveles discutidos dentro de la UE.

3.5. Hidrógeno verde uso a nivel mundial

Las búsquedas mundiales en el uso de energías limpias es una de las principales prioridades para lograr alcanzar un mundo más sostenible. No obstante, existen territorios a nivel mundial que se encuentran más avanzados con respecto al uso de energías

vinculadas al hidrógeno para la disminución de la contaminación y mejorar sus procedimientos productivos produciendo así la descarbonización del país hacia una economía sostenible.

En este caso, se ha analizado un informe estipulado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), titulado de esta forma (IRENA, 2022), encargado del análisis de los posibles cambios climáticos, políticos y financieros que se producen en concordancia al panorama de producción energética. Asimismo, el hidrógeno podría llegar a representar una solución con resultados impactante dentro del mundo, siendo los países líderes en la producción de hidrógeno a nivel mundial los siguientes:

1. China
2. Estados Unidos
3. La Unión Europea
4. Australia
5. Japón
6. Corea del Sur
7. Chile

El transporte es uno de los sectores clave en los que se busca utilizar el hidrógeno verde. Se están desarrollando y probando vehículos de hidrógeno, como automóviles, camiones y autobuses, en diferentes países. Además, se están proporcionando estaciones de servicio de hidrógeno para proporcionar la infraestructura necesaria. Algunos países, como Japón, Corea del Sur y Alemania, han establecido objetivos ambiciosos para la adopción de vehículos de hidrógeno y están invirtiendo en la expansión de la infraestructura de hidrógeno. En el caso de los alemanes tienen en proceso sus propios proyectos de hidrógeno verde en territorio nacional. El más grande es el de AquaVentus, en la pequeña isla de Heligoland, en el mar del Norte.

Algunos países con abundantes recursos de energía renovable, como Australia y Chile, están explorando la posibilidad de convertirse en exportadores de hidrógeno verde. Estos países podrían producir hidrógeno verde utilizando su energía renovable excedente y exportarlo en forma líquida a otros países que no tienen la misma capacidad de generación de energía renovable. Esta opción de comercio internacional de hidrógeno verde podría

desempeñar un papel importante en la transición global hacia una economía de baja en carbono.

Como hemos comentado, Australia que es la nación más grande de Oceanía lidera los planes de producción de este nuevo combustible limpio con propuestas para construir 5 megaproyectos en su territorio, gracias a sus enormes recursos de energía renovable, en particular la eólica y solar. El proyecto más grande -del país y del mundo- es el Asian Renewable Energy Hub, en Pilbara, Australia Occidental, donde se planea construir una serie de plantas con electrolizadores con una capacidad total de 14GW. Se prevé que el proyecto de US\$36.000 millones esté listo para 2027-28. (BBC News Mundo, 2021)

Es importante tener en cuenta que la adopción generalizada del hidrógeno verde a nivel mundial aún enfrenta desafíos significativos, como la reducción de costes, la ampliación de la infraestructura, el desarrollo de tecnologías de producción más eficientes y la superación de barreras legales que están reguladas. Sin embargo, existe un impulso creciente para aprovechar el potencial del hidrógeno verde como una opción energética sostenible y limpia en todo el mundo.

Sin embargo, por otra parte, los líderes mundiales de exportación de combustible fósiles como son Omán, Emiratos Árabes y Arabia Saudita, quienes en su proceso de diversificar sus economías y transformarlas en el consumo de energías renovables para unirse a las propuestas pautadas para 2050 buscan el hidrógeno verde como una alternativa de disminuir los impactos causados al medio ambiente.

3.6. Hidrógeno verde frente a otras energías.

En primer lugar, se comprende el vector energético como una entidad encargada de vincular realizando un puente entre las energías primarias y el consumo final de dichas energías. En este caso el hidrógeno como una energía alternativa, intenta ser un puente en cuanto al almacenamiento de la energía y la producción del propio hidrógeno, con la finalidad de ser transportada y lograr la extracción de hidrógeno en otros lugares.



Fuente: Asociación española del hidrógeno, 2023.

Las características fundamentales que comprenden el hidrógeno verde es la obtención del hidrógeno como una energía alternativa sin la necesidad de generar emisiones de CO₂ al ambiente. Para lograr este procedimiento, se genera hidrógeno por medio de electrolisis del agua, siendo en este caso, el agua un elemento común y abundante para el aporte de energías eléctricas.

Es importante que los aportes vinculados a las energías eléctricas durante este procedimiento se presenten por medio de energía generada de forma renovable, de esta manera se consigue un proceso de transformación de energías renovables en las descomposiciones del agua en oxígeno y en hidrógeno, para que posteriormente sea utilizado como combustible en su proceso inverso generando electricidad y los residuos puedan ser convertidos en vapor de agua sin perjudicar al medio ambiente.

El hidrógeno verde es característico por su sostenibilidad y la capacidad disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia del carbón y el petróleo, es decir, combustibles fósiles, estos producen emisiones directas de dióxido de carbono al quemarse que el hidrógeno no produce. Por ello, el hidrógeno con respecto a esta energía ayuda a reducir el cambio climático y la dependencia de estos combustibles.

Durante décadas, la energía nuclear ha sido empleada como una fuente de energía de gran escala, libre de emisiones de carbono. Aunque no produzca gases de efecto invernadero, existen inquietudes en relación con la seguridad, los residuos nucleares

y la destrucción de armas atómicas ya que pueden afectar a la salud de las personas. En este contexto, el hidrógeno verde se presenta como una posible alternativa en sectores que no pueden electrificarse de manera sencilla, como el transporte pesado o la industria.

4. Objetivos de sostenibilidad del hidrógeno verde

A largo plazo, El hidrógeno verde se posiciona como uno de los principales vectores energéticos porque sus métodos de producción y consumo son climáticamente neutros, con el beneficio de no generar emisiones contaminantes. En comparación con otros portadores de energía, el hidrógeno tiene la capacidad de almacenarse, ya sea en forma gaseosa o líquida, lo que permite una mejor gestión del mismo.

De esta forma, teniendo en cuenta la hoja de ruta, cuyo objetivo es desarrollar el hidrógeno verde en el territorio de España, gracias al papel que se le exige a este elemento para participar en el proceso de transición energética para des-carbonizar la economía hasta 2050, porque de hecho actúa como portador de una fuente de energía flexible, permitiendo así la integración de la electricidad renovable al tiempo que documenta una mayor penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico. Asimismo, permite la sustitución de materias primas industriales o fuentes de energía fósil por materias primas renovables, abriendo así una nueva vía tecnológica para la electrificación de vehículos y la movilidad sostenible.

4.1.Contexto Europeo

Las políticas y objetivos de sostenibilidad están vinculados a escenarios discutidos en la UE. De esta forma, en la acción de recuperación se pone de manifiesto el hidrógeno verde como una opción beneficiosa en la Directiva 2018/2001, el 11 de diciembre de 2018. El documento prevé la promoción del uso de energías renovables; además, la Iniciativa Hidrógeno lanzada en Linz en el mismo año fue respaldada como un medio para destacar la energía del hidrógeno por parte de los Estados miembros de la UE, la Comisión Europea y otros organismos, así como por varias organizaciones con importantes intereses políticos, sociales y económicos una declaración consistente de fuerza. Las tecnologías de alto voltaje pueden contribuir al proceso de descarbonización de diferentes

sectores económicos, la seguridad del suministro a largo plazo y la evolución de la competencia financiera en toda Europa.

De esta manera el pacto sostenible afianzado por la UE⁴, abarca dentro de la previsión del desarrollo la aprobación de herramientas estratégicas de financiación para el desarrollo y promoción de la cadena de valor que conforma la participación del hidrógeno verde. Por lo tanto, dentro de las políticas a emplear en el pacto, las estrategias europeas para el hidrógeno tienen como principal objetivo especificar las pautas correspondientes de la economía de la UE de forma eficaz.

Para llevar a cabo estas medidas, dichas estrategias deben abordar los principales campos de actuación en inversiones, regulaciones políticas, liderazgo en el mercado, I+D de mercados y tecnologías, redes de infraestructuras y la cooperación de países externos. En este contexto, la estrategia en Europa del hidrógeno verde como factor esencial en el respaldo del compromiso de la UE en el alcance neutral del carbono para el año 2050 y al mismo tiempo, respaldar los esfuerzos de otros países a nivel global para emplear el acuerdo de París trabaja en conjunto con medidas innovadoras que permite su participación en el medio.

De este modo, se indica que el ecosistema del hidrógeno en territorio europeo tiene altas probabilidades de desarrollo por medio de trayectorias graduales, a distintas velocidades en los diferentes sectores y posiblemente zonas, requiriendo de esta manera una gran cantidad de soluciones de carácter político.

Para garantizar los avances tecnológicos del hidrógeno, las estrategias pautadas señalan tres horizontes temporales pautados para el año 2024, 2030 y 2050; donde determinan un cambio en el alcance de las siguientes fases:

- a) **Primera fase (2020-2024): se comienza con la instalación de 6GW de electrolizadores en territorio europeo y las producciones de 1 millón de toneladas de hidrógeno verde para la descarbonización la producción del Hidrógeno existente hasta el momento.** En este particular se puede hacer énfasis

⁴ Pacto Verde Europeo (European Green Deal)

en el sector químico, el cual por medio de este procedimiento se le facilitará el consumo de hidrógeno verde en aplicaciones nuevas para su uso final como lo es en el ámbito industrial y el transporte pesado. En este caso, los electrolizadores se irán instalando en conjunto a los centros de demanda existentes en las refinerías, complejos químicos y plantas de acero. Lo esencial es alimentar de forma directa las fuentes locales de electricidad.

Adicional a esto, se necesitará de hidrogenaras para los repostajes de los medios de transporte eléctricos de pilas de combustibles como los autobuses, alimentados de esta manera con hidrógeno y en una etapa posterior a esta de los camiones eléctricos de pila de combustibles. Por tales motivos, es necesario de electrolizadores para el suministro local de un determinado número de estaciones de repostaje de hidrógeno.

- b) **Segunda fase (2025-2030): el Hidrógeno se transforma en una parte esencial del sistema energético constituido con el objetivo estratégico de instalar 40 GW de electrolizadores para el año 2030 y la producción de 10 millones de toneladas de hidrógeno verde en la UE.** De este modo, se espera que el hidrógeno sea competitivo en comparación con otros métodos de producción del hidrógeno, aunque se necesitan de políticas para controlar su demanda, con la finalidad de que la demanda del sector industrial incluya de forma gradual nuevas aplicaciones, incluyendo en este caso, la fabricación de camiones, acero, ferrocarriles y ciertas aplicaciones de transporte marítimo, además de otros medios de transporte.

Por lo tanto, el hidrógeno comenzará a desenvolver un rol importante en el equilibrio y flexibilización de los sistemas eléctricos orientados a las energías renovables, al momento de transformar la electricidad en hidrógeno cuando dicha electricidad sostenible es económica y abundante para cubrir las demandas sociales.

Asimismo, el hidrógeno también será utilizado en el almacenamiento estacional o cotidiano como el respaldo y “buffer”, perfeccionando la seguridad del suministro a un medio plazo.

- c) **Tercera fase (2030-2050): las diversas tecnologías implementadas en el HV deberían lograr la madurez necesaria con el propósito de desplegarse a gran escala hasta llegar a cada uno de los sectores complejos de descarbonizar, donde otro tipo de alternativas no son factibles o incluso, pueden tener costos muy elevados.** Durante esta fase, la producción eléctrica sostenible debe incrementarse de forma masiva, debido a que una cuarta parte de la electricidad renovable puede usarse en la producción del hidrógeno para 2050.

Adicional a esto, el hidrógeno y los diversos combustibles de origen sintéticos derivados del hidrógeno podrían penetrar de forma amplia en una extensa gama en los diversos mercados, desde el transporte marítimo y la aviación, hasta los sectores industriales y la educación compleja de descarbonizar.

En este sentido, el biogás sostenible puede jugar un papel importante en la sustitución del gas natural en las instalaciones de producción de hidrógeno, y la captura y el almacenamiento de carbono pueden generar emisiones negativas, siempre que se pueda evitar la fuga de metano. En línea con los objetivos y principios sostenibles marcados por la Unión Europea.

4.2.Contexto nacional

A nivel nacional, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (en adelante, PNIEC) tiene como objetivo destinar un 1,8 a gases sostenibles mejorados. Se refiere a stocks de varios tipos de gases renovables, como el biogás, el hidrógeno y el biometano de fuentes renovables (tanto los recursos implementados como la energía utilizada en sus procesos). Estas medidas determinan que se potenciará la penetración del gas natural sostenible mediante la aprobación de determinados esquemas, incluyendo en este caso el uso de biogás, hidrógeno y biometano renovable, entre otros esquemas muy importantes.

Asimismo, se estima el papel del hidrógeno en la gestión de las emisiones renovables dentro del sistema eléctrico. Acción 1.2 Gestión de la demanda, almacenamiento y flexibilidad. Además, el fomento de los vehículos eléctricos de la medida 2.4, es decir, el aumento de los vehículos de pila de combustible que se encuadran en esta categoría.

Así, a nivel normativo, el proyecto de ley sobre cambio climático y transición energética prescrito por el Consejo de Ministros a la corte el 19 de mayo de 2020 establece que las entidades gubernamentales fortalecerán su enfoque en los gases renovables mediante la aprobación de planes estratégicos.

No obstante, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima se ha fijado objetivos a un plazo comprensible entre 2021 y 2030, con una estrategia a largo plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente sostenible, con una perspectiva reforzada para 2050. Todo esto a través de una mayor absorción de los sumideros, lo que reducirá las emisiones de gases intensificadores de efecto invernadero en un 90% para 2050 en comparación con la década de 1990.

Para ir de la mano con el fortalecimiento de estas estrategias, se requieren cambios profundos en la estructura del sistema energético, que pueden enfatizar la integración del almacenamiento de energía eléctrica y el sector inteligente.

Como resultado de todo lo anterior, se propone una hoja de ruta para identificar mecanismos de acción, identificar prioridades y recursos necesarios para implementar esta transformación y mejorar la viabilidad de la vida humana en el mundo; y los principales desafíos del desarrollo de hidrógeno y la posibilidad de superarlos. mide, permitiendo así el despliegue de vectores energéticos en territorio español, posicionando a dicho país como referente y facilitador de tecnologías de futuro.

5. Objetivos para la descarbonización

El hidrógeno verde se ha convertido en una de las soluciones más prometedoras para abordar el desafío de la descarbonización y combatir el cambio climático. En este texto, exploraremos en detalle los objetivos del hidrógeno verde y su contribución a la descarbonización en diferentes sectores de la economía.

En primer lugar, es importante comprender qué es el hidrógeno verde y cómo se produce. El hidrógeno verde se obtiene a través de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, como la solar o la eólica. Durante este proceso, se descompone el agua en

hidrógeno y oxígeno, y el hidrógeno resultante se almacena y utiliza como una fuente de energía limpia y libre de emisiones de carbono.

Uno de los objetivos principales del hidrógeno verde es reemplazar gradualmente los combustibles fósiles en sectores clave de la economía, como el transporte, la industria y la generación de energía. Estos sectores son responsables de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y representan un desafío significativo para lograr la descarbonización. La adopción del hidrógeno verde en estos sectores puede reducir las emisiones y ayudar a mitigar el cambio climático.

En el sector del transporte, el hidrógeno verde puede desempeñar un papel fundamental en la transición hacia una movilidad sostenible y libre de emisiones. Los vehículos de hidrógeno son impulsados por pilas de combustible que generan electricidad a partir de la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno. A diferencia de los vehículos convencionales que funcionan con combustibles fósiles, los vehículos de hidrógeno solo emiten vapor de agua como subproducto. Además, tienen una mayor autonomía y un tiempo de recarga más rápido en comparación con los vehículos eléctricos de batería, lo que los convierte en una opción atractiva para la movilidad a largo plazo.

En el ámbito industrial, el hidrógeno verde puede ser utilizado como una fuente de energía limpia y eficiente en diversos procesos. Muchas industrias dependen actualmente de combustibles fósiles para alimentar sus operaciones, lo que resulta en emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Al reemplazar estos combustibles fósiles por hidrógeno verde, es posible reducir las emisiones contaminantes y avanzar hacia una producción más sostenible. Por ejemplo, en la fabricación de acero, el hidrógeno verde puede reemplazar el coque de carbón utilizado en el proceso de reducción de mineral de hierro, lo que resulta en una reducción significativa de las emisiones de carbono.

Otro objetivo del hidrógeno verde es su integración con las energías renovables. A medida que la capacidad de generación de energía renovable, como la solar y la eólica, continúa creciendo, surge la necesidad de almacenar y utilizar esa energía de manera eficiente. Aquí es donde el hidrógeno verde desempeña un papel clave. La electrólisis del agua para producir hidrógeno verde puede usarse como un medio de almacenamiento de energía a gran escala. El exceso de energía renovable generada durante períodos de alta producción

puede ser utilizado para producir hidrógeno verde, que puede ser almacenado y utilizado cuando la demanda energética es alta o la producción de energía renovable es baja. Esto ayuda a equilibrar la oferta y la demanda de energía y optimizar la utilización de fuentes renovables.

Además de su contribución a la descarbonización en el transporte, la industria y la integración con energías renovables, el hidrógeno verde también puede tener impactos positivos en la creación de empleo y el impulso económico. La transición hacia una economía del hidrógeno verde tendrá inversiones significativas en infraestructura, tecnologías y capacitación de personal. Esto generará oportunidades de empleo en sectores relacionados, como la producción de equipos y sistemas de hidrógeno, la construcción de infraestructuras de carga y almacenamiento, y la investigación y desarrollo de tecnologías relacionadas. Además, la producción y exportación de hidrógeno verde puede convertirse en una fuente de ingresos para los países que tienen un potencial significativo para la producción de energía renovable.

En resumen, el hidrógeno verde tiene varios objetivos clave para contribuir a la descarbonización y combatir el cambio climático. Su adopción en el transporte, la industria y la generación de energía puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ayudar a alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático. Además, su integración con las energías renovables puede mejorar la eficiencia y la estabilidad del sistema energético, maximizando la utilización de fuentes limpias de energía. La transición hacia una economía del hidrógeno verde también puede generar empleo e impulsar el crecimiento económico. En conjunto, estos objetivos hacen del hidrógeno verde una herramienta poderosa para la descarbonización y una pieza clave en la lucha contra el cambio climático a nivel global.

6. Uso en España % energía

6.1. Oportunidades para España con el uso de hidrógeno para descarbonizar

En España, el hidrógeno verde sigue siendo un porcentaje relativamente pequeño en comparación con otras fuentes de energía utilizadas. A pesar de los importantes avances en la producción y el uso de hidrógeno verde en el país, su contribución a la matriz

energética sigue siendo limitada. Sin embargo, se están haciendo esfuerzos para hacer que sea más popular y para que contribuya más rápidamente a la transición energética.

Actualmente, España depende en gran medida de fuentes de energía tradicionales, como los combustibles fósiles y la energía nuclear. La mayor parte de la producción de energía del país se basa en el uso de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón. A pesar de que la energía nuclear desempeña un papel importante, especialmente en la producción de energía, la urgencia de disminuir las emisiones de carbono y avanzar hacia una economía baja en carbono ha llevado a un mayor enfoque y desarrollo en las energías renovables.

En España, las fuentes de energía renovable como la energía solar y eólica han experimentado un aumento notable en los últimos años. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica se han convertido en fuentes importantes de generación de energía, lo que ha contribuido significativamente a la diversificación de la matriz energética y a la reducción de las emisiones de carbono.

No obstante, en cuanto al hidrógeno verde, su contribución en la generación de energía en España no ha llegado a coger la importancia que debería tener con respecto a las otras energías utilizadas. A pesar de que se están construyendo plantas piloto para producir hidrógeno verde en el país, su producción y uso no han alcanzado niveles significativos. En España se han llevado a cabo cuatro iniciativas que serán cruciales en el futuro para la expansión de otros proyectos en todo el país.

El actual gobierno ha financiado estas cuatro empresas para impulsar el uso de este elemento, las cuales son SENER, NORDEX, IVECO y H2B2. Estas cuatro empresas financiadas por el gobierno quedarían detalladas así: H2B2, establecido en Sevilla y enfocada en los electrolizadores, con una ayuda de 24,9 millones de euros; NORDEX, que tiene dos plantas en Asturias y Navarra y se orienta también en electrolizadores con una ayuda de 11,6 millones de euros; SENER, que se encuentra instalada en el País Vasco y promueve la fabricación de los electrolizadores con una ayuda de 10 millones de euros e IVECO con plantas en Madrid, Valladolid y Barcelona, que plantea la producción de vehículos comerciales de transporte pesado propulsados por hidrógeno con una ayuda de 27,05 millones de euros. (Prensa Europa,2023)

Es importante destacar que el desarrollo y la implementación del hidrógeno verde en España no se limitan solo a la producción y el uso interno. El país también está trabajando en la exportación de hidrógeno verde a otros países, especialmente a través de proyectos de transporte y almacenamiento. Esto permitiría aprovechar el potencial de España en la producción de hidrógeno verde y generar beneficios económicos adicionales. Esto para el país generaría riqueza y favorece al país posicionándose como un país promotor de esta energía en el camino hacia la descarbonización, aprovechando el plan que ha propuesto el gobierno para 2030, también conocido como el Corredor de Hidrógeno, se trata de un gasoducto subterráneo conectado entre Barcelona y Marsella, para ese año el gobierno pretende posicionarse como uno de los principales exportadores de hidrógeno verde, por eso el corredor se usaría entre una de sus funciones para enviar hidrógeno verde a Europa. Este proyecto se considera una oportunidad para el país, considerando que beneficia la expansión de esta energía y abre camino hacia una economía descarbonizada.

A pesar de que el porcentaje de hidrógeno verde en la matriz energética española es aún bajo, se espera que su participación aumente en los próximos años. El Gobierno español ha establecido objetivos ambiciosos para la descarbonización y la transición energética, lo que incluye el impulso del hidrógeno verde como una de las tecnologías clave. Se están implementando políticas y medidas de apoyo, así como incentivos para fomentar la producción y el uso del hidrógeno verde en el país.

En conclusión, a día de hoy, el hidrógeno verde representa un porcentaje bajo en la matriz energética de España en comparación con otras fuentes de energía renovable y convencional. Sin embargo, se están realizando esfuerzos significativos para aumentar su producción y uso en el país. El desarrollo y la implementación del hidrógeno verde en España se están centrando en proyectos piloto y aplicaciones específicas en sectores clave como la movilidad y la industria. Se espera que, en los próximos años, con el impulso de políticas y medidas de apoyo, el hidrógeno verde juegue un papel cada vez más importante en la transición hacia una economía de baja en carbono en España.

6.2. Hidrógeno que se necesitaría en 2030 y 2050

Numerosos factores afectan a la hora de producir hidrógeno verde, por lo que realizar una estimación exacta sobre el hidrógeno verde que se producirá o se necesitaría para los años 2030 y 2050 es una tarea compleja. Las medidas adoptadas por los gobiernos en esta época de transición sostenible, los retos de disminuir las emisiones, la disponibilidad o el incremento de la demanda de otro tipo de energías son algunos factores que dificultan la estimación exacta sobre el hidrógeno que se necesitaría.

En este apartado, realizaremos una estimación aproximada, teniendo en cuenta que la IEA, es decir, la Agencia Internacional de Energía publicó un estudio en el cual se hablaba de que la producción anual de hidrógeno verde era de 70Mt. Para poder descarbonizar este hidrógeno, se deben producir cantidades elevadas de hidrógeno verde. Según algunos análisis estudiados, para poder llegar a descarbonizar este hidrógeno y llegar a la meta propuesta de 2050, harían falta entre 600 y 800 Mts de hidrógeno verde para llegar a conseguir los objetivos propuestos.

Dentro de España, el hidrógeno verde es acogido como uno de los principales temas relevantes en los debates estratégicos para el fortalecimiento sostenible del territorio a corto, medio y largo plazo. El territorio cuenta, por tanto, con una Hoja de Ruta del Hidrógeno 2020, estimada en medio de la crisis financiera y social provocada por la pandemia del Covid-19, en la que se estiman los desarrollos relacionados con el hidrógeno como herramienta para fortalecer la diversificación industrial y económica.

La estrategia se centra en la creación de valles de hidrógeno, o clúster de hidrógeno, donde se pueda concentrar la producción y el consumo, atrayendo actividad económica relacionada con la molécula. Por lo tanto, las dimensiones externas de la estrategia de hidrógeno de España fueron relativamente complejas en su diseño inicial.

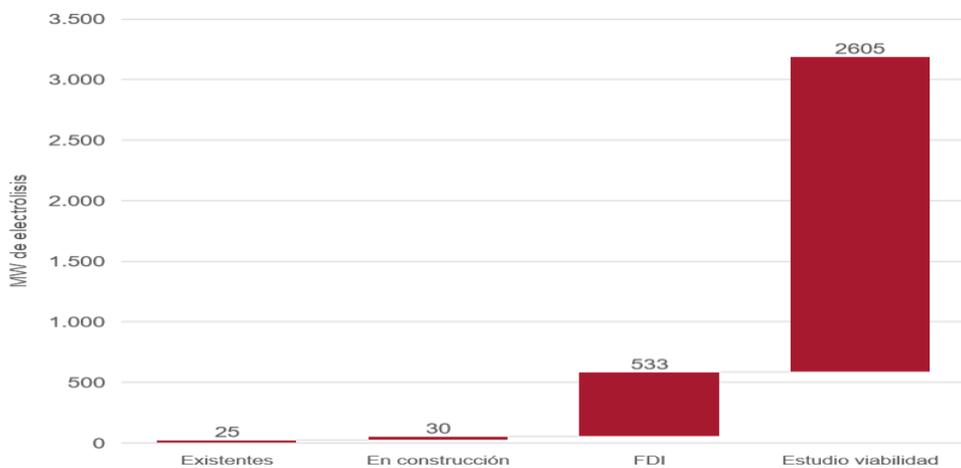
Por otro lado, se han producido situaciones, como la invasión rusa de territorio ucraniano, que desencadenó una serie de estrategias de la Unión Europea encaminadas a elevar las ambiciones en materia de energía renovable del hidrógeno, lo que supuso un cambio consecuente en la política de España hacia el uso de hidrógeno, fortaleciendo así sus dimensiones externas en la escala.

En este contexto, las estrategias marcadas en la hoja de ruta desarrollada por España, así como dentro del sector privado, muestran una clara preferencia por el hidrógeno renovable frente a otras alternativas bajas en carbono, dando cierta continuidad estratégica a su desarrollo nacional. Otros jugadores europeos con preferencias técnicas más ambiguas. Para ello, a nivel externo, España participa activamente en el desarrollo de estándares de sostenibilidad a nivel europeo, permitiendo que el hidrógeno renovable español se beneficie de sus ventajas competitivas.

En el caso de España, las posibles barreras a la interconexión de Iberia con los mercados europeos históricamente regulados de Francia en materia de electricidad y gas se complican con el hidrógeno, que se orienta principalmente hacia la nuclear.

El hidrógeno es el portador de la integración y cooperación energética a largo plazo en el espacio energético euro-mediterráneo, así como el portador de la cooperación y la inversión empresarial Latinoamérica.

Ilustración Las Capacidades de los proyectos de hidrógeno verde señalados en territorio español por estado en 2022-2030 (MW)



basado en

Fuente: AIE, Hydrogen Project Database, octubre de 2022.

7. Cantidad de energía necesaria para crear hidrógeno que deberíamos producir en las fechas estimadas.

Un sistema de electrólisis completamente eficiente requiere 39 kWh de electricidad para producir 1 kg de hidrógeno. Sin embargo, el equipo típicamente usado para este proceso

es menos eficiente. Las cifras operativas típicas rondan los 48 kWh por kilogramo de hidrógeno. Todas estas situaciones demuestran que el HV es la nueva moda en el sector energético. Este portador de energía es clave para cumplir el objetivo de descarbonización para 2050. Por lo tanto, la industria experimentará un verdadero auge en los próximos años. Al menos cree Bloomberg, a través de su unidad BNEF.

Según el último informe de BNEF Electrolyzer, los electrolizadores globales crecerán de 2 GW a fines de 2022 a no más de 240 GW para 2030. En otras palabras, un aumento de 100 veces en ocho años. Estos electrolizadores de 240 GW para la generación de hidrógeno verde podrán producir 25 millones de toneladas de hidrógeno limpio. El mundo producirá 200.000 toneladas de hidrógeno este año.

Ilustración Estimación de la demanda y fortalecimiento por territorio

Figure 2: Cumulative electrolyzer capacity by region, 2030

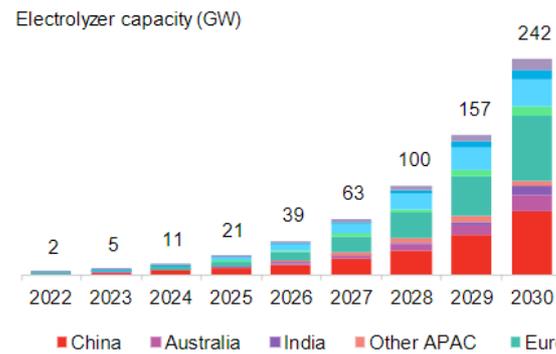
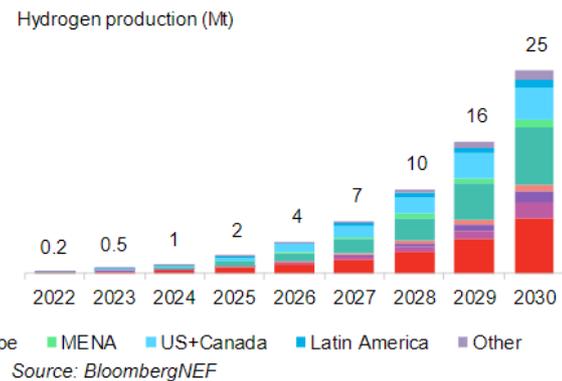


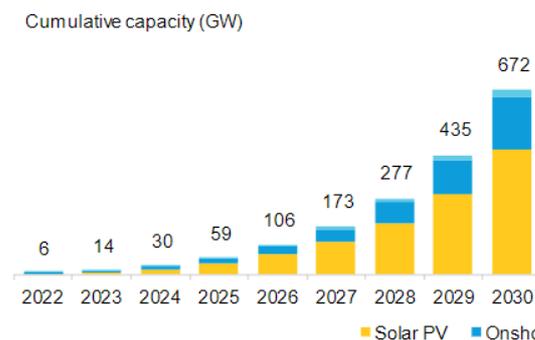
Figure 3: Green hydrogen production by region, 2030



Estos fuertes crecimientos ocurrirán principalmente en dos regiones, Europa y China, que dominarán el negocio global de nuevas energías. Lejos está EE. UU. + Canadá o India. Según un informe de BNEF, 240 GW de electrolizadores requerirían nada más y nada menos que 1.300 TWh de energía renovable a nivel mundial. Todas estas fuentes representan el 4% de las necesidades eléctricas del mundo. Similar a la necesidad de vehículos eléctricos en 2030, habrá un esfuerzo real para instalar energías renovables durante la próxima década. Dependiendo de cuánta energía solar se necesite, la capacidad añadida a la combinación de electricidad renovable será una. Por esta razón, se pueden requerir alrededor de 770 GW de energía renovable, en su mayoría solar.

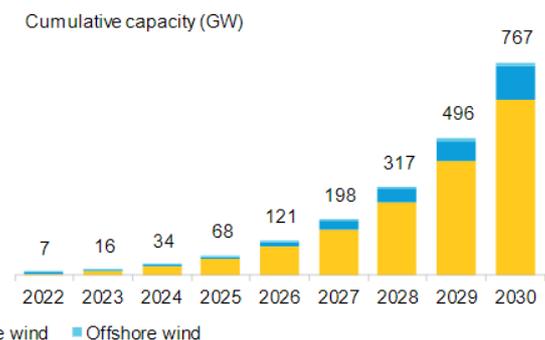
Ilustración Demandas por año hasta 2030

Figure 28: Renewables demand for electrolyzers by type, 50% solar, 40% onshore and 10% offshore wind scenario



Source: BloombergNEF. Note: Assumes 50% of electricity demand for electrolyzers is supplied by solar PV, 40% by onshore and 10% by offshore wind.

Figure 29: Renewables demand for electrolyzers by type, 70% solar, 25% onshore and 5% offshore wind scenario



Source: BloombergNEF. Note: Assumes 70% of electricity demand for electrolyzers is supplied by solar PV, 25% by onshore and 5% by offshore wind.

8. Riesgos en la producción de hidrógeno verde

En la búsqueda de respuestas sostenibles con respecto al medio ambiente a las cuestiones sobre la situación climática y la transición energética, el hidrógeno verde, denominado como el hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovables, se ha presentado como una respuesta prometedora. A pesar de sus ventajas potenciales, el uso y la aplicación del hidrógeno verde conllevan riesgos.

Dos de los principales riesgos son la producción y el almacenamiento del hidrógeno verde. Para completar el proceso de electrólisis del agua, teniendo en cuenta que es el proceso fundamental en la producción de esta energía, se necesita una cantidad significativa de energía renovable, como la solar o la eólica, para la producción de hidrógeno verde. Aunque estas fuentes de energía son limpias, su disponibilidad puede variar, lo que podría repercutir en la producción en curso del hidrógeno verde. La producción a gran escala también requerirá infraestructuras caras y complejas, que podrían tener un impacto medioambiental significativo mientras se construyen.

El transporte y el almacenamiento del hidrógeno verde son otros riesgos asociados con los que se debe tener precaución cuando tratamos de este tema. Por ser un gas altamente inflamable y volátil, el hidrógeno debe manipularse y almacenarse con precaución. Esto implica el desarrollo de tecnologías y medidas de seguridad apropiadas para garantizar el

transporte y el almacenamiento seguros a largas distancias. Cualquier incumplimiento de estas medidas podría resultar en resultados graves, como incendios o explosiones.

Además, existe un peligro en la factibilidad económica del hidrógeno verde. Producir hidrógeno verde sigue siendo más caro que otras formas de producir energía convencional, a pesar de que los costes de producción están disminuyendo gradualmente. La creación de una infraestructura de producción, almacenamiento y distribución a gran escala requiere inversiones significativas, que podrían requerir subsidios o incentivos del gobierno para ser rentable. Esto implica la posibilidad de que los proyectos de hidrógeno verde no sean rentables a corto plazo o dependan de financiamiento público a largo plazo.

Por otro lado, la producción y extracción de las materias primas necesarias para la fabricación del hidrógeno verde plantean riesgos ambientales. Por ejemplo, la producción de hidrógeno verde a gran escala requeriría una cantidad significativa de agua limpia, lo que podría provocar desacuerdos sobre el acceso y la gestión del agua en zonas donde el suministro necesario es insuficiente. Además, si no se realiza de forma responsable, la extracción de minerales como el platino o el níquel que son utilizados para crear los objetos que tienen como función generar el cloro necesario para la desinfección del agua, estos objetos son conocidos como las células de electrólisis utilizadas para producir hidrógeno verde, esta extracción de estos minerales puede tener efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana si no se hace de forma responsable.

En resumen, aunque el hidrógeno verde puede ser una fuente de energía sostenible, también conlleva importantes riesgos. Para reducir los riesgos asociados con el hidrógeno verde, los factores clave que deben abordarse de manera integral son la producción y almacenamiento de seguros, la viabilidad económica, la gestión responsable y la disponibilidad de recursos ambientales. Para garantizar que el hidrógeno verde se convierta en una opción energética segura y sostenible a largo plazo, es fundamental evaluar y reducir estos riesgos a medida que cambie la tecnología y las regulaciones.

9. Conclusión

En base a este estudio realizado, hemos analizado la situación actual del hidrógeno verde en su proceso hacia un futuro sostenible, su producción, las distintas aplicaciones, las políticas aplicadas y su relación con la descarbonización entre otros objetivos analizados.

En conclusión, se ha demostrado que el hidrógeno verde es un recurso prometedor y valioso para combatir el cambio climático y la descarbonización de la economía. A lo largo de este trabajo de fin de grado, hemos examinado su potencial, sus ventajas y los desafíos de implementarlo.

A lo largo de este análisis hemos analizado que el hidrógeno verde ha representado una doble oportunidad dentro del marco español, debido a que, principalmente considerando su consumo doméstico, esta metodología y estrategia representada como un vector de reindustrialización descarbonizada. España podría posicionarse como el centro de producción de hidrógeno verde dentro de Europa ya que, al poseer los costes de energía más bajos dentro del marco europeo, el hidrógeno verde se comercializaría a precios inferiores con respecto a otros países.

Hemos concluido que España puede proporcionar una gran cantidad de hidrógeno verde a la UE obtenido principalmente de forma económica, política, social y medioambiental bajo los parámetros de sostenibilidad. En base a las inversiones realizadas por el gobierno en el fomento y la implementación de este recurso a través de proyectos para poder producirlo y en un futuro como hemos explicado antes poder posicionarse a la cabeza de Europa como exportador principal de hidrógeno verde y aumentar así los beneficios económicos impactando en la economía.

Por lo tanto, las estrategias para el fortalecimiento y aumento de las interconexiones con otros territorios se han estimado en estos últimos tiempos por medio de la hoja de ruta de hidrógeno sostenible centrado principalmente en España bajo los parámetros expuestos por la UE, los cuales fueron motivados por los distintos escenarios producidos en territorios quienes eran principales exportadores de hidrógeno.

Se estima que, a largo plazo, este elemento provoque un cambio radical en el camino hacia la descarbonización en la mayoría de los sectores, como hemos comentado anteriormente en los sectores de movilidad, la industria, en la producción de elementos químicos y en la generación de electricidad.

Bajo el contexto nacional, las estrategias de España se centran en la evolución de clústeres y valles de carácter industrial. Sin embargo, España se encuentra definiendo sus métodos de desarrollo en base a su hoja de ruta establecida, considerando en este caso el hidrógeno renovable como la mayor apuesta. En este escenario, es importante seguir evolucionando y creando estrategias que contribuyan con el alineamiento de las dimensiones nacionales e internacionales en el desarrollo del hidrógeno en España, con el objeto de ser un referente e impulsor a nivel energético para el mundo.

A partir de este estudio realizado podemos decir que el hidrógeno verde se reconoce como una alternativa relevante para enfrentar los cambios climáticos, denominándose la energía del futuro, estimando que para el año 2050 el mercado compuesto por el hidrógeno verde pueda llegar superar una gran parte del consumo actual tanto en España, como en Europa.

Como hemos estudiado en este análisis, el uso del hidrógeno renovable o hidrógeno verde se limitaba antiguamente a los vehículos propulsados por las pilas de combustibles. Sin embargo, tras años de estudios y avances en este elemento, está previsto que se puedan destinar grandes cantidades a industrias que son las primeras protagonistas en comprometer el medio ambiente por la cantidad de emisiones de CO₂, las cuales son muy complejas de disminuirse, afectando de esta manera a los cambios climáticos en el mundo. Por otro lado, hemos analizado que, aunque puede ser un recurso con un futuro muy prometedor dentro de la economía nacional e internacional y en el proceso de descarbonizar el mundo, este recurso presenta riesgos que se deben tener siempre en cuenta a la hora de producirlo y comercializarlo como pueden ser la producción y almacenamiento de esta energía, el transporte y la extracción de ciertos minerales que se encuentran dentro del proceso de producción.

Por todos estos motivos expuestos, es importante mantener los estudios y análisis que expongan la importancia del uso de energías renovables como en este caso la energía que llevamos analizando durante todo el trabajo, el hidrógeno verde, en el consumo diario de

cada uno de los sectores que hemos mencionado anteriormente, evitando problemas e inconvenientes que puedan presentarse en un futuro. Manteniendo la idea en la que se ha fundamentado este trabajo, la cual se basa en que el hidrógeno verde tiene el potencial suficiente para ser el combustible del futuro y ser la pieza clave en el camino hacia la descarbonización, por lo que es crucial continuar con las políticas y desarrollando los proyectos que fomentan el uso y producción del hidrógeno verde para que se desarrolle y se adopte, lo que permitirá un mundo más limpio y sostenible.

10. Bibliografía

Biodiversidad, F. (2020). Política de Medio Ambiente: . Obtenido de <https://www.edp.com/es/sostenibilidad/politica-de-medio-ambiente>

Biodiversidad, F. (2021). EDP. Obtenido de <https://ieeb.fundacion-biodiversidad.es/empresas-adheridas/edp>

Biodiversidad, F. d. (2019). Memoria de Sostenibilidad . Obtenido de <https://espana.edp.com/sites/default/files/202005/MS%20EDP%20Espa%C3%B1a%202019.pdf>

Biodiversidad, f. d. (2020). Fundación EDP:. Obtenido de <https://www.fundacionedp.es/es/>

Biodiversidad, F. d. (2021). Informes de medio ambiente:. Obtenido de • Informes de medio ambiente: <https://www.edp.com/es/sostenibilidad/transparencia-e-informes#informes>

Consulting, A. E., & Management, A. (2021). No-regret hydrogen: Charting early steps for H₂ infrastructure in Europe, Berlín.

Escribano, G. (2021). H2 Med: impulsores y barreras geopolíticas y geoeconómicas para el hidrógeno en el Mediterráneo. Elcano Policy Paper. Madrid: Elcano, mayo.

Escribano, G., Lázaro, L., Urbasos, I. (2022). El desarrollo del hidrógeno: estrategias y políticas en Europa y España. ^Revista internacional de Política Económica^, 4(2), 84-97.”

España., L. E. (2019). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. . Secretaría de Estado de Energía. 2022. ISSN 2444-7102. Consultado el 27 de abril de 2022.

Felipe Givovich, J. Q.-H. (2022). La revolución del hidrógeno verde y sus derivados en Magallanes. . El Líbero.

Gutiérrez Jodra, L. (2003). España y la energía: un punto de vista académico. Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp). 100 No. 1. pp. 83-103. Consultado el 21 de diciembre de 2010.

IAG. (2019). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>.

IRENA. (2021). World Energy Transition Outlook, 1.5°C Pathway, .

IRENA. (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor,. doi:
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>.

IRENA. (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf.

IRENA. (2022). Global Hydrogen Trade Outlook <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-Outlook>. .

IRENA. (2022). Green Hydrogen Certification, . doi:https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Certification_Brief_2022.pdf.

LA SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO VERDE . (2021, 15 de julio). MAPFRE Riesgos Globales. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-seguridad-en-la-industria-del-hidrogeno-verde/>

Martín, A. (2018, 19 de noviembre). Economía circular; qué es, cómo funciona y ejemplos . OVACANO. <https://ovacen.com/economia-circular/>

Mix, T. E. (2022). Green Hydrogen Will Cost Less than Fossil-Fuelled “Blue”, Shell CEO Admits, . doi:<https://www.theenergymix.com/2022/08/07/green-hydrogen-will-cost-less-than-fossilfuelled-blue-shell-ceo-admits/>.

ONU. (2020). El Estado de Los Bosques Del Mundo 2020 : Los Bosques, la Biodiversidad Y Las Personas (Italia: FAO. ed.).

Prensa Europa. (2023). El Gobierno subvenciona con 74 millones los proyectos de hidrógeno de Sener, Nordex, Iveco y H2B2 . <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-gobierno-subvencionara-proyectos-hidrogeno-sener-nordex-iveco-h2b2-elegidos-bruselas-20230110142752.html>

Prieto Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de. España: Memoria Investigaciones en Ingeniería. Obtenido de http://www.um.edu.uy/docs/Economia_Circular.pdf

Urbasos, I. (2022). España aprovecha la crisis energética para redoblar su apuesta europea por el hidrógeno verde, Real Instituto Elcano, Comentario. Madrid, mayo

Ventajas y desventajas del hidrógeno como fuente de energía. (n.d.). Baxi.es. Retrieved June 9, 2023, from <https://www.baxi.es/ayuda-y-consejos/normativa-y-renovables/hidrogeno-ventajas-y-desventajas>